

同軸 2 段対向噴霧方式を用いた不均質燃焼場の燃焼改善について

著者	劉 金茹
出版者	法政大学大学院理工学研究科
雑誌名	法政大学大学院紀要．理工学・工学研究科編
巻	61
ページ	1-5
発行年	2020-03-24
URL	http://doi.org/10.15002/00022761

同軸 2 段対向噴霧方式を用いた不均質燃焼場の 燃焼改善について

A STUDY OF COMBUSTION IMPROVEMENT BY USING COAXIAL MULTIPLE IMPINGING FUEL
INJECTION UNDER HETEROGENEOUS COMBUSTION FIELD

劉金茹

Jinru LIU

指導教員 川上忠重

法政大学大学院理工学研究科機械工学専攻修士課程

Direct injection has been widely used in internal combustion engines from the enhancement of knock resistance, the improvement of fuel consumption and the high thermal efficiency. On the other hand, problems such as adhesion of fuel to the wall surface and unburned components have been point out. Also the 20%-30% of the input heat quantity is lost as cooling loss²⁾ which can't be ignored. Previous researches¹⁾ indicated that the impinging injection can help with these problems. Therefore, in this study, we focused on the influence factors as the injection timing, the amount ratio of fuel injection and the fuel properties. Through the examination of the effects on the combustion improvement by using Coaxial Multi-impinging Fuel Injection(CMFI), we performed consideration by the observation of flame behaviors, Sauter Mean Diameter(SMD) of liquid fuel which the previous researched have proofed that the SMD is influenced by the fuel properties³⁾, and the combustion characteristics like the Maximum Burning Pressure(MBP), the Total Burning Time(TBT) and the Rate Of Heat Release(ROHR). The main conclusions are as follows:

(1) It is possible to improve the combustion characteristics under heterogeneous combustion field by using the impinging injection.

(2) The most suitable conditions of the injection timing and the amount of fuel injection ratio exist for combustion improvement by using the Coaxial Multi-impinging Fuel Injection.

Key Words : *impinging injection, combustion improvement, atomization*

1. 緒論

近年、内燃機関の排気ガスなどによる環境汚染問題が重要な課題である。特に内燃機関において、燃費や熱効率向上などの観点から、筒内直接噴射方式が数多く用いられているが、噴霧燃料の壁面付着により、未燃成分が発生する問題点や、さらに壁面熱損失も大きな割合を占めるため、冷却損失の低減も重要である。冷却損失低減に向けて、現在多段噴射を用いて時空間的に火炎を制御する方法や壁面温度を制御する方法など様々な方法が提案されている²⁾。

これらの改善法の一つとして、対向噴霧が注目されている。先行研究¹⁾では、対向噴霧方式を用いた場合、壁面への燃料付着を低減させ、液滴燃料の微粒化促進による燃焼改善効果があることが確認されている。

そこで本研究では、同軸 2 段対向噴霧方式を用いた場合の燃焼特性(最高燃焼圧力、全燃焼時間)、火炎挙動及び

燃焼室内における異種燃料の噴霧粒径の観察により、不均質燃焼場での燃焼改善効果に及ぼす噴射タイミングと噴射量割合の影響および液体燃料の衝突による燃料微粒化効果に関する検討を行った。

2. 実験装置及び方法

(1) 実験装置

Fig.1 に実験装置の概略図を示す。装置は主に燃焼容器、データサンプリング制御系及び燃料噴射装置、点火装置とその遅延回路から構成されている。**Fig.2** に燃焼特性観察用容器 A 及び火炎挙動観察用燃焼容器 B を示す。

燃焼特性観察実験には、**Fig.2** 左側の燃焼容器 A (内容積約 2500cc) を使用した。本体に取り付けられたピエゾ式圧力ピックアップセンサーにより、燃焼圧力履歴を観察することが可能である。

火炎挙動観察と噴霧粒径測定実験は **Fig.2** 右側の燃焼

容器 B(内容積約 450cc)を使用した。本体には火炎挙動観察用の厚さ 30mm のアクリル板を取り付け、撮影には高速カメラフォトロンを使用し、フレームスピードを 1000 fps とした。粒径測定実験は Microtrac 社製粒子径分布装置、エアロトラック LDSA-SPR1500A を使用した。

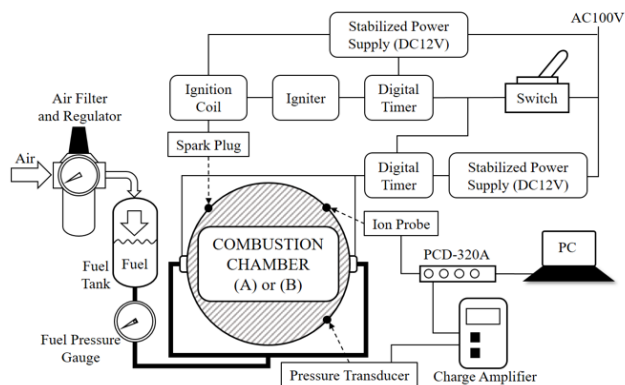


Fig.1 Experiment apparatus

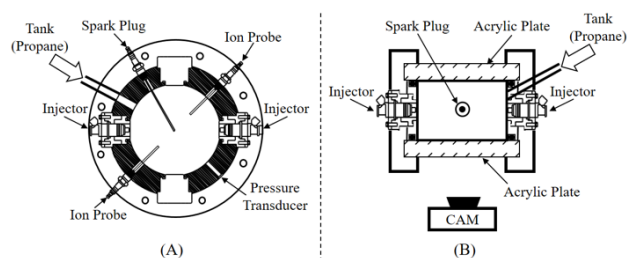


Fig.2 Combustion vessel

(2) 実験条件

Table 1 Fuel properties

Fuels	i-octane	n-hexadecane	n-octane
Properties			
Viscosity[cp]	0.502	3.454	0.5466
Boiling point[K]	372	560	398
Density[g/ml]	0.69	0.774	0.70
Kinematic viscosity[mm ² /s]	0.738	4.445	0.735

Table 1 に燃料性状⁴⁾⁵⁾を、Table 2 に噴霧粒径測定実験の実験条件を示す。Fig.3 に粒径測定実験の測定位置を示す。測定位置 20mm とは、右側インジェクターの噴霧口出口から 20mm 位置を測定点とした。粒径測定実験は燃焼容器 B を使用した。両側のアクリル板を取り外し、レーザ回折測定法(LDSA)を用いて、測定点を固定し、異種燃料のザウター平均粒径(SMD)が測定された。

Table 3 に燃焼特性と火炎挙動観察実験の実験条件、Table 4 に液体燃料の噴射条件をそれぞれ示す。本実験は燃焼室を真空した後、あらかじめ作成しておいた所定当

量比のプロパン-空気混合気を大気圧で封入し、スイッチの投入により遅延回路を介して燃料噴射と火花点火を行うことで、不均質燃焼場を模擬した燃焼場の観察を行った。

Table 2 SMD measurement conditions

Measurement interval [msec]	0.3
Measure times	100
Fuel type	n-hexadecane / n-octane
Injection method	Inpinging inj. / Oneside inj.
Measure point	Center/20 mm
Injection pressure [MPa]	0.2/0.3/0.4/0.5

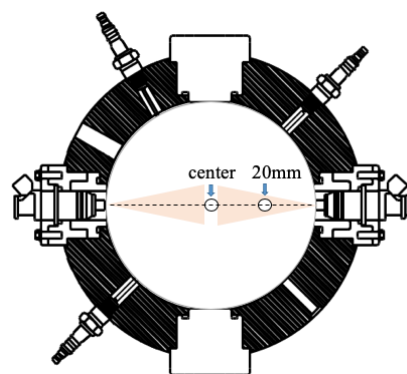


Fig.3 SMD measure point

Table 3 Experimental conditions

Liquid fuel types	n-hexadecane	i-octane
Overall equivalence ratio Φ	0.95	1.17
Equivalence ratio(Propane) ϕ	0.7	0.7
Fuel injection pressure [MPa]	0.3	0.3

Table 4 Injection timing conditions

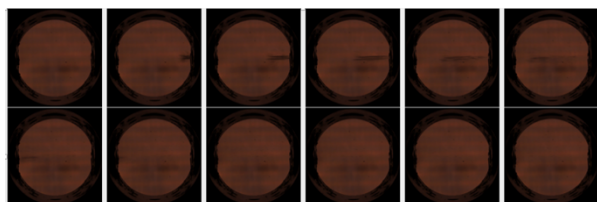
Injection timing difference to ignition [sec]	One side	Single	± 0.000
	Impinging	Single	$-0.030 \sim +0.030$
		CMFI I	$-0.030 / \pm 0.000$
		CMFI II	$-0.030 / +0.030$
Injection amount ratio of CMFI (First, Second)		CMFI III	$\pm 0.000 / +0.030$
		A	23%, 77%
		B	40%, 60%
		C	77%, 23%
		D	50%, 50%

3. 実験結果及び考察

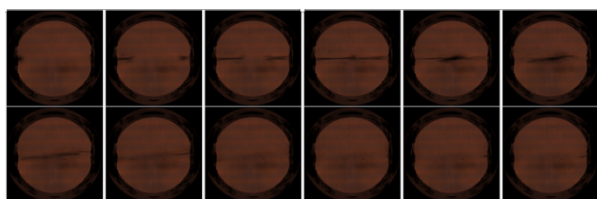
(1) 噴霧挙動及び火炎挙動

Fig.4 に噴射圧 0.5MPa を用いた場合、(a)片側噴霧と(b)対向噴霧の噴霧挙動の代表例をそれぞれ示す。片側噴

霧の場合は右側インジェクターのみを使用した。液滴燃料が右側から噴射され、左側壁面と衝突した後、微小な液滴の跳ね返り現象が観察された。一方、対向噴霧では、液体燃料が両側から噴射され、燃焼室の中心位置で衝突し、燃焼室内での拡散が確認された。

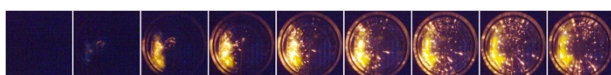


(a) One-side injection

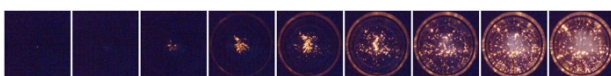


(b) Impinging injection

Fig.4 Liquid fuel spray behavior of different injection method



(a) One-side injection



(b) Impinging injection

0 8 16 24 32 40 48 56 64

Time after ignition [msec]

Fig. 5 Flame behavior of different injection(n-hexadecane)

Fig. 5 に噴射タイミングを基準噴射(± 0.000)とした、(a)片側噴霧と(b)対向噴霧の火炎挙動の代表例を示す。片側噴霧では、右側インジェクターから燃料が噴射された後、プロパン-空気混合気の火炎面を貫いて、燃焼室左側の壁面に衝突した。その後、火炎の広がり及び壁面から右側への跳ね返す液滴挙動も観察された。一方、対向噴霧において、燃料が燃焼室の中心付近で衝突し、プロパン-空気混合気の火炎面と共に、外周への広がりが確認された。火炎挙動の観察結果は、噴霧観察の結果とほぼ一致している。

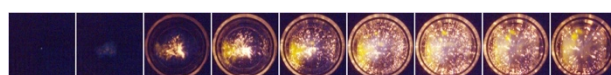
Fig.6 に同軸多段対向噴霧(Coaxial Multi-impinging Fuel Injection, CMFI)を用いた場合の火炎挙動の代表例を示す。噴射量割合を **Table 4** の条件 D とした。

図(a)の噴射タイミングを CMFI-I($-0.030 / \pm 0.000$)とした。一段目は先噴射となり、点火より早めに燃料を噴射させた。燃焼初期では、プロパン-空気混合気の火炎伝播に伴って、予混合火炎の青炎も確認されている。

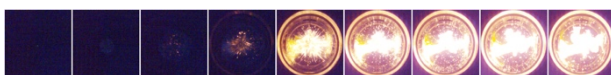
図(b)の噴射タイミングを CMFI-II($-0.030 / +0.030$)とし、先噴射と後噴射となる。24msec までに、プロパン-空気混

合気の火炎伝播と輝炎が確認され、二段目の燃料噴射により、噴霧燃焼が急速に進行している。

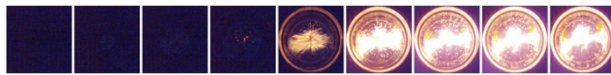
図(c)では噴射タイミングを CMFI-III($\pm 0.000 / +0.030$)とし、基準噴射と後噴射である。燃料初期では図(a)、(b)より輝炎の発生が減少している。これは、噴射一段目において噴射タイミングによる燃料の予混合効果が低減したと考えられる。二段目では後噴射による急速な噴霧燃焼が確認された。**Fig.6** の火炎挙動から、先噴射による予混合化による初期燃焼期間での燃焼改善効果には最適条件が存在することは明らかである。すなわち、噴霧改善効果に対する噴霧微粒化の影響を確認する必要がある。



(a) CMFI-I-D



(b) CMFI-II-D



(c) CMFI-III-D

0 8 16 24 32 40 48 56 64

Time after ignition [msec]

Fig 6 Flame behaviors of CMFI

(2) 噴霧粒径

したがって、ザウタ平均粒径(SMD)を式(1)を用いて算出した。

$$SMD = \frac{\sum V_i}{\sum \left(\frac{V_i}{d_i^3}\right)} \quad (1)$$

ここで

i : 粒子個数

V : 粒子体積

d : 粒子直径

である。

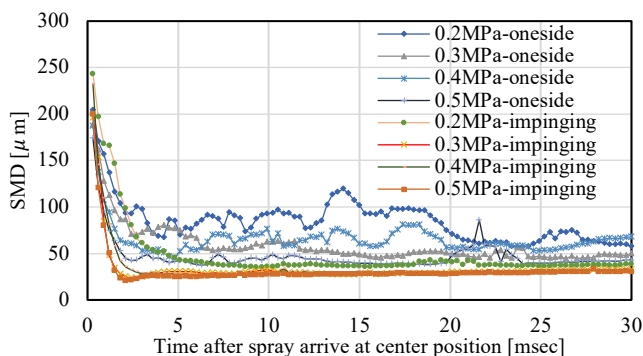


Fig.7 The SMD of one-side injection and impinging injection under different injection pressure with n-octane

Fig.7 に n-octane を液体燃料として用いた場合、片側噴霧と対向噴霧での、燃焼室中心位置における各噴射圧条件で測定したザウタ平均粒径 (Sauter Mean Diameter, SMD)を示す。噴霧方法に関わらず、噴霧先端が中心位置に到着した後、噴射圧の増大に伴って、粒径が減少する傾向を示すが、片側噴霧方式に比べて、対向噴霧方式を用いた場合、粒径がより減少する傾向が観察された。これは対向噴霧方式では、液体燃料の衝突による燃料微粒化効果と考えられる。さらに、対向噴霧を用いた場合、燃料性状の影響について考察を行った。

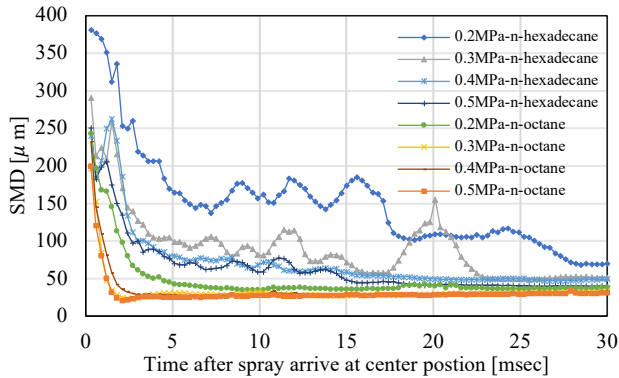


Fig.8 The SMD on center position with impinging injection under different injection pressure

Fig.8 に燃焼室中心位置において、n-hexadecane と n-octane を液体燃料として用いた場合の粒径測定結果を示す。n-hexadecane を用いた場合、噴射圧の増大につれて粒径が減少する傾向を示す。一方、n-octane を用いた場合、燃料性状の影響により粒径が減少し、また噴射圧の増大に伴って、衝突初期から燃料の微粒化効果が促進されることが確認された。

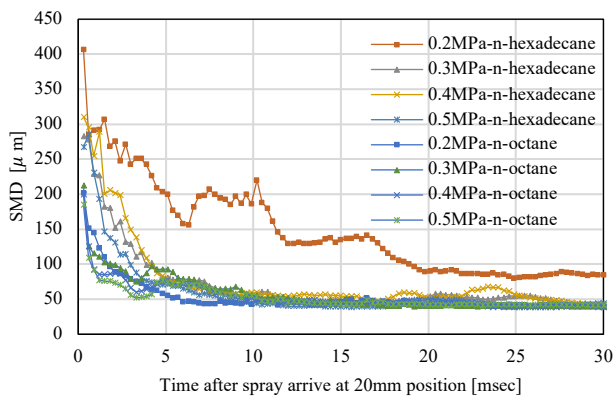


Fig.9 the SMD on 20mm position with impinging injection under different injection pressure

Fig.9 に対向噴霧方式を用いた場合、測定位置 20mm で、n-hexadecane と n-octane を液体燃料として用いた場合の粒径測定結果を示す。燃焼室中心位置と同じく、噴射圧の

増大に伴って粒径が減少する傾向を示したが、中心位置に比べ、粒径がやや大きくなることが確認された。

Fig.9 に対向噴霧方式を用いた場合、測定位置 20mm で、n-hexadecane と n-octane を液体燃料として用いた場合の粒径測定結果を示す。燃焼室中心位置と同じく、噴射圧の増大に伴って粒径が減少する傾向を示したが、中心位置に比べ、粒径がやや大きくなることが確認された。

(3) 燃焼特性観察

Fig.10 に液体燃料を n-hexadecane にし、基準噴射に対して、噴射方式を CMFI にした場合の最高燃焼圧力(MBP)と全燃焼時間(TBT)の増減率を示す。計算式は式(2)に示す。

$$IR[\%] = \frac{CMFI - standard}{standard} \times 100 \quad (2)$$

Fig.10 から、基準噴射に対して全条件で MBP の増大が確認された。また、CMFI-II-A では最大増加率が確認された。一方、TBT では各噴射タイミングでの減少効果が確認された。すなわち、多段対向噴霧を用いた場合、噴射タイミング及び噴射量の調整による燃焼改善効果が確認され、多段対向噴霧の有効性も示唆される。

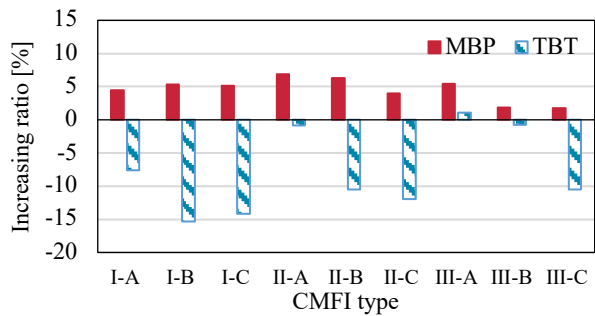


Fig.10 Increasing ratio of MBP and TBT(n-hexadecane)

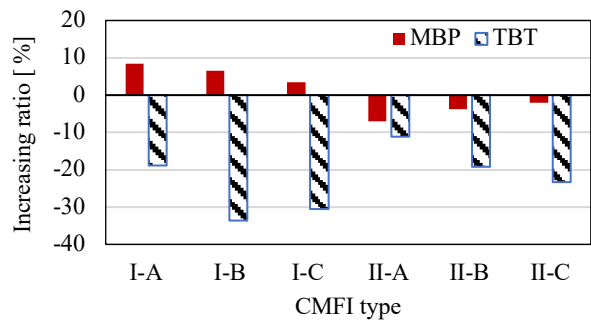


Fig. 11 Increasing ratio of MBP and TBT(i-octane)

Fig.11 に液滴燃料を i-octane にし、基準噴射に対して、噴射方式を CMFI にした場合の最高燃焼圧力(MBP)と全燃焼時間(TBT)の増減率を示す。**Fig.11** から、CMFI-I 条件のみで MBP の増大、及び CMFI-I-A にて最大増加率が確認された。一方、各条件における TBT の短縮が確認された。i-octane と n-hexadecane を液体燃料とした場合、各噴射条件では TBT の短縮効果が示された。これらより、多

段対向噴霧を用いる場合、最高燃料圧力と全燃焼時間の改善効果には最適条件が存在することが確認された。

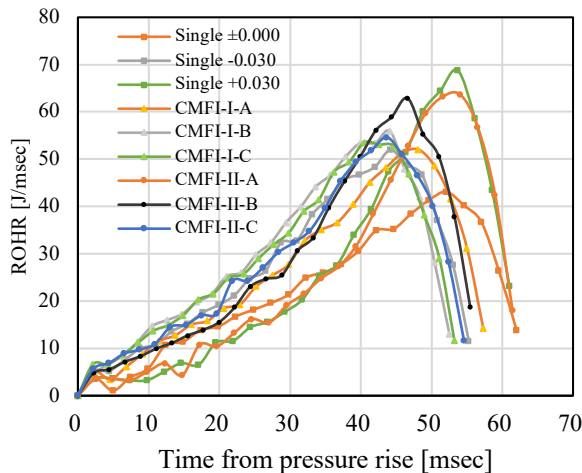


Fig.12 ROHR of impinging injection (n-hexadecane)

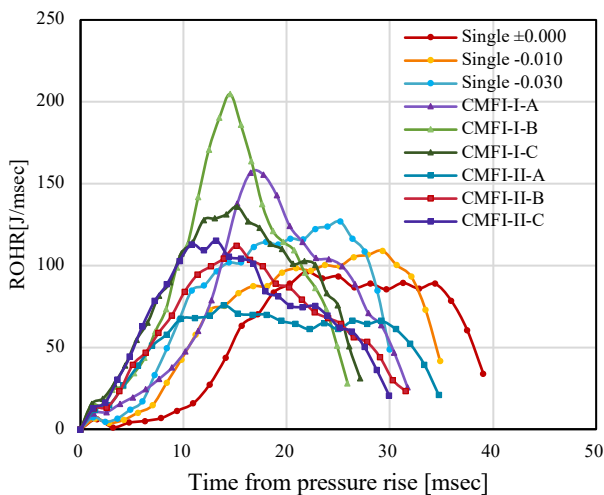


Fig.13 ROHR of impinging injection (i-octane)

Fig.12 と Fig.13 に液体燃料をそれぞれ n-hexadecane と i-octane とした場合、各噴射条件での圧力上昇の確認された時点からの時間に対する熱発生率を示す。熱発生率は、以下の式(3)を用いて算出された。

$$\frac{dQ}{dt} = \frac{c_v}{R} V \frac{dP}{dt} \quad (3)$$

ここで

dQ/dt : 熱発生率

C_v : 定容比熱

R : 気体定数

P : 圧力

V : 燃焼室容積

である。

Fig.12 から明らかなように、全ての条件において基準噴射の対向噴霧方式よりも、最大熱発生率の増大が確認された。特に CMFI-I(B,C)では、他の対向噴霧条件や多段

噴射方式と比較して、著しい急速燃焼が実現されており、先の Fig.10 の全燃焼時間の短縮効果の結果と一致している。

Fig.13 では、燃料性状の影響により、CMFI-I-B の場合において、圧力の上昇から約 15msec 所で熱発生率が最大値になることが観察された。さらに、条件 CMFI-I(A,B,C) の最大熱発生率は他の対向噴霧条件と比較して大きいことが確認された。これらの結果から、燃焼特性改善効果には燃料性状に強く依存することが示唆される。今後、同軸多段対向噴霧を用いた場合、高温高圧場における燃焼改善効果に及ぼす燃料性状の影響について、検討する予定である。

4. 結論

本研究では、同軸 2 段対向噴霧方式を用いた場合の粒径分布、火炎挙動と燃焼特性の観察により、液滴の微粒化と燃焼改善効果に及ぼす燃料性状と噴射方式の影響について検討を行った。以下に結論を示す。

- 1) 対向噴霧方式を用いることにより、不均質燃焼場での燃焼特性改善が可能である。
- 2) 同軸 2 段対向噴霧を用いた場合、燃焼改善効果には最適噴射タイミングと噴射量割合条件が存在する。

謝辞: 本研究を行うにあたり終始ご指導くださいました、川上忠重教授に御礼申し上げますとともに、心より感謝の意を示す。また、エネルギー変換工学研究室の院生、学部生の皆様、本研究の実施に際して、多くの協力を頂き、共に研究を励んだ青木洸樹氏、大岩亮友、鈴木達氏、小宮浩太郎氏にも感謝申し上げます。

参考文献

- 1) 寺門駿, 川上忠重: 密閉容器を用いた不均質燃焼場での燃料特性に関する研究, 日本機械学会講演会論文集, GS0505,180-1,2018
- 2) 巽健, 前田篤志ら: ディーゼル噴霧火炎における壁面熱損失に関する研究, 自動車技術会講演会, Vol.47,No6,November 2016
- 3) 広安博之, 新井雅隆, 田端道彦: ディーゼル噴霧の粒径に及ぼす燃料粘度の影響, Journal of the M.E.S.J, Vol.20, No3,1984
- 4) イソオクタン, 丸善石油化学株式会社, https://www.chemiway.co.jp/product/data/i_data01.html
- 5) N-hexadecane, fuel properties, Dortmund Data Bank, <http://ddbonline.ddbst.com/DDBSearch/onlineddboverview.exe?submit=Overview&systemcomplist=516>
- 6) N-octane,安全データシート, 昭和化学株式会社, <http://www.st.rim.or.jp/~shw/MSDS/15003250.pdf>